

SPEKTRAL REMOTE SENSING REFLEKTANSI PERMUKAAN AIR LAUT

SPECTRAL OF REMOTE SENSING REFLECTANCE OF SURFACE WATERS

Bisman Nababan¹, Anak A.G. Wirapramana¹, dan Risti E. Arhatin¹

¹Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan,
Institut Pertanian Bogor, Bogor. Email: bisman@ipb.ac.id

ABSTRACT

Spectral measurements of remote sensing reflectance (R_{rs}) of surface waters in the northeastern Gulf of Mexico were conducted in various seasons in 1999-2000 using Fieldspec Analytical Spectral Devices (ASD) Spectroradiometer. Filtering process was performed on the data to eliminate invalid data. In general, in coastal waters particularly near rivers mouth (water type-2) the R_{rs} spectrals were relatively low at blue, maximum at green, and decreased to a minimum value at the red wavelength. In offshore waters (type-1), the general pattern of R_{rs} spectrals were maximum at the blue wavelength and then continued to decline at the green wavelength until the minimum value at the red wavelength except during summer where R_{rs} spectrals in most offshore area having the maximum value at the green wavelength due to the phytoplankton bloom as a result of freshwater intrusion from the Mississippi river. In general, the patterns and values of R_{rs} were significantly different among seasons and locations. Results showed that R_{rs} values at the blue wavelength ($\lambda=400$ nm) were generally higher in the spring than in other seasons ranging of $0.007-0.018$ sr^{-1} in offshore waters and $0.004-0.015$ sr^{-1} in coastal waters. During spring, R_{rs} values at the green wavelength ($\lambda=500$ nm) were also higher than in other seasons ranging of $0.005-0.013$ sr^{-1} found in coastal waters. However, during summer in coastal waters, the maximum values of R_{rs} spectrals were found in different green wavelength on different locations showed the differences in the type and composition of phytoplankton, organic materials, and suspension matters at those locations.

Keywords: remote sensing reflectance, phytoplankton, offshore, coastal, Gulf of Mexico.

ABSTRAK

Pengukuran spektral *remote sensing* reflektansi (R_{rs}) dilakukan di perairan timur laut Teluk Meksiko pada berbagai musim tahun 1999-2000 dengan menggunakan *Fieldspec Analytical Spectral Devices* (ASD) *spectroradiometer*. Proses *filtering* dilakukan terhadap data untuk menghilangkan data yang dianggap tidak valid. Secara umum spektral R_{rs} pada perairan pesisir khususnya dekat muara sungai (perairan tipe-2) memiliki pola spektral yang relatif rendah pada gelombang biru dan maksimum pada gelombang hijau serta menurun sampai minimum pada gelombang merah. Pada perairan *offshore* (tipe-1), secara umum pola spektral R_{rs} maksimum pada gelombang biru kemudian terus menurun pada gelombang hijau sampai minimum pada gelombang merah kecuali pada musim panas dimana spektral R_{rs} pada sebagian besar daerah *offshore* memiliki nilai maksimum pada gelombang hijau akibat adanya *blooming* fitoplankton di daerah ini sebagai hasil intrusi air tawar dari sungai Mississippi. Secara umum pola dan nilai spektral R_{rs} berbeda nyata antar musim dan lokasi. Nilai R_{rs} gelombang biru ($\lambda=400$ nm) pada musim semi secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan musim lainnya berkisar $0,007-0,018$ sr^{-1} pada perairan *offshore* dan $0,004-0,015$ sr^{-1} pada perairan pesisir. Nilai R_{rs} gelombang hijau ($\lambda=500$ nm) pada musim semi juga memiliki nilai paling tinggi berkisar $0,005-0,013$ sr^{-1} pada perairan pesisir. Umumnya nilai maksimum R_{rs} gelombang hijau berada pada panjang gelombang dan lokasi yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan dalam jenis dan komposisi fitoplankton, bahan organik, dan muatan tersuspensi pada lokasi tersebut.

Kata kunci: remote sensing reflektansi, fitoplankton, offshore, pesisir, Teluk Meksiko.

I. PENDAHULUAN

Remote sensing reflektansi (*Remote sensing reflectance*, R_{rs}) dari permukaan air laut didefinisikan sebagai fraksi radiansi yang dipantulkan oleh permukaan air laut (baik yang dipantulkan oleh lapisan tipis permukaan air laut secara langsung maupun cahaya yang terhamburkan oleh kolom air sampai ke permukaan) dengan intensitas cahaya (irradiansi) yang diterima pada permukaan air tersebut (Mobley, 1994; Kirk, 1994; Liew *et al.*, 2000; Hu, 2003). Oleh karena itu, nilai R_{rs} ini dapat digunakan sebagai penciri warna kolom air laut karena setiap kandungan materi yang berbeda dalam kolom air laut akan menghamburkan warna yang berbeda.

Nilai R_{rs} yang berupa *apparent optical properties* (AOP) dipengaruhi oleh intensitas dan struktur geometrik cahaya datang serta kandungan partikel (plankton dan non-plankton) dan materi organik terlarut (*colored dissolved organic matter* (CDOM)) dalam kolom air (Nababan, 2009, 2008a, 2008b; Sathyendranath, 2000; Mobley, 1994; Kirk, 1994). Pengukuran nilai spektral R_{rs} dilakukan untuk melakukan kajian pada warna perairan, estimasi kandungan suatu perairan melalui pemodelan algoritma bio-optik, dan dapat digunakan untuk kalibrasi dan validasi pengukuran citra satelit. Karakteristik suatu perairan dapat juga ditentukan berdasarkan variabilitas nilai R_{rs} (Nababan *et al.*, 2011; Hu, 2003; Eurico and Miller 2002; Liew *et al.*, 2000).

Perairan timur laut Teluk Meksiko merupakan perairan yang memiliki dinamika oseanografi yang signifikan seperti *upwelling*, pertemuan dua massa air tawar dan air laut, muara dari beberapa sungai, angin, *Loop Current*, dan proses biogeokimia lainnya (Gilbes *et al.*, 1996; Muller-Karger, 2000; Nababan, 2011; Nowlin *et al.*, 2000; Yang and Weiberg,

1999). Perairan timur laut Teluk Meksiko memiliki variabilitas musiman yang tinggi akibat adanya sirkulasi *off shelf* yaitu siklon, antisiklon, dan perputaran arus (*loop current*) yang bervariasi (Ohlmann and Niiler, 2005; Nowlin *et al.*, 2000). Sungai Mississippi yang merupakan sungai keempat terbesar di dunia berfungsi sebagai pemasok utama nutrient dan zat organik kedalam perairan timur laut Teluk Meksiko. Hal ini sangat mempengaruhi produktivitas primer dan nilai bio-optik kelautan di perairan ini (Gilbes *et al.*, 1996; Muller-Karger, 2000; Nababan, 2011, 2008a; Walsh *et al.*, 2003). Sungai lainnya seperti sungai Mobile, Escambia, Chocta-whatchee, Apalachicola, dan Suwannee merupakan sungai yang memberikan pengaruh signifikan terhadap kondisi biologi, kimia, dan fisik di perairan timur laut Teluk Meksiko melalui masukan air tawar, nutrient, bahan organik, dan sedimen yang berbeda pada setiap musim sehingga memberikan pengaruh terhadap sebaran spasial dan temporal dari flux karbon dan produksi primer di perairan tersebut (Walsh *et al.*, 2003; Eurico *et al.*, 2002; Lohrenz *et al.*, 1990; Walker, 1996).

Beberapa studi terakhir telah banyak memfokuskan mengenai pengaruh dari adanya masukan dari beberapa aliran sungai yang mempengaruhi proses fisik dan biogeokimia di perairan timur laut Teluk Meksiko. Akan tetapi pengaruhnya terhadap pola dan nilai spektral R_{rs} masih sangat minim.

Dinamika fisik di perairan ini dipengaruhi oleh masukan dari daratan. Sirkulasi perairan di Teluk Meksiko secara umum dimulai dengan aliran air yang memasuki teluk melalui Selat Yucatan, kemudian bersirkulasi sebagai *Loop Current*, dan keluar melalui Selat Florida yang pada akhirnya dapat membentuk *Gulf Stream*. Bagian-bagian dari *Loop Current* sering melepaskan diri membentuk pusaran atau 'gyres' yang

dapat mempengaruhi pola arus regional (Ohlmann and Niiler, 2005; Walker, 1996; Huh *et al.*, 1981). Pola arus dan proses fisik serta bio-kimia yang sangat dinamis pada perairan Timur Laut Teluk Meksiko membuat perairan ini sangat dinamis disertai dengan minimnya informasi dan penelitian terkait nilai dan sebaran R_{rs} di perairan ini maka penelitian tentang karakteristik spektral remote sensing reflektansi di perairan timur laut Teluk Meksiko sangat penting untuk dilakukan.

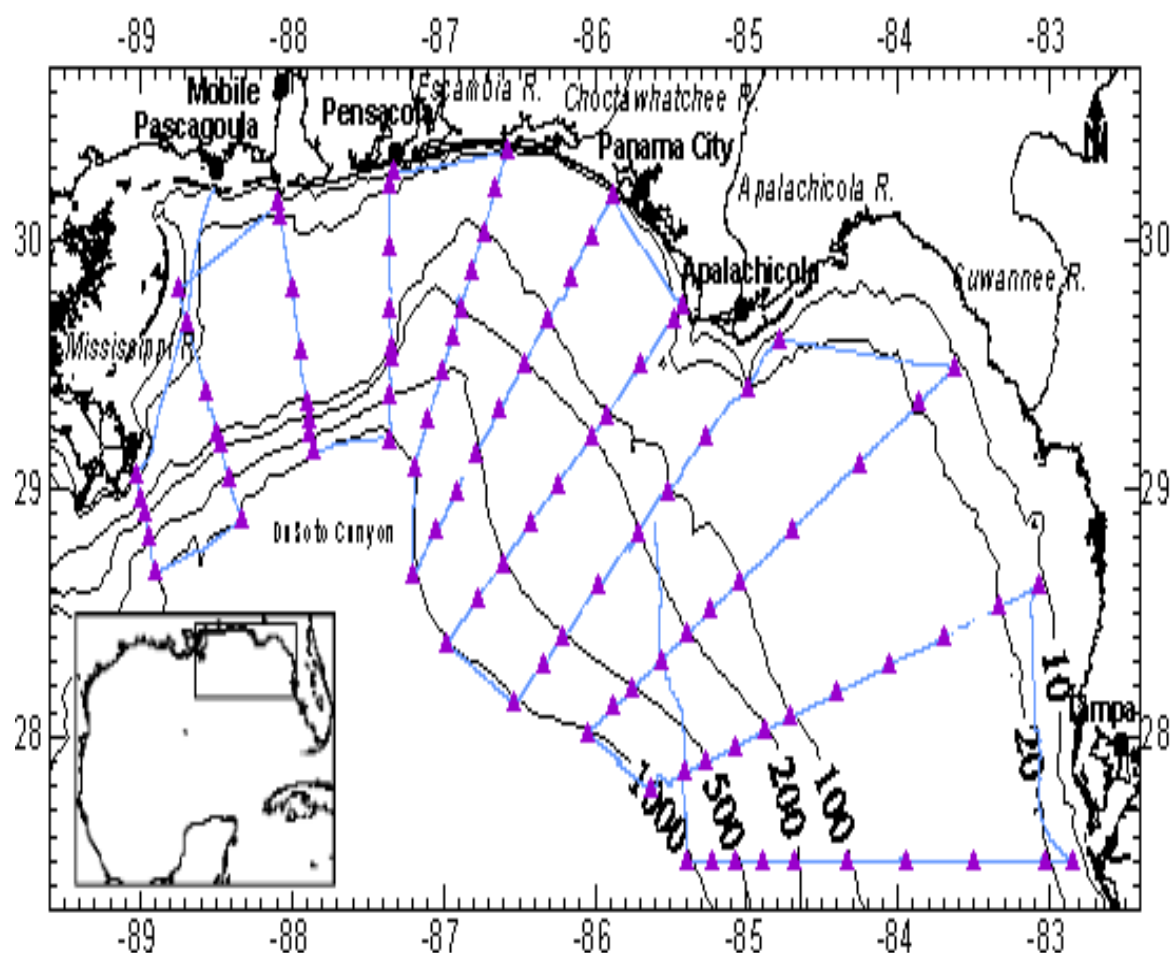
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai dan variabilitas *remote sensing* reflektansi dari permukaan air laut pada berbagai musim dan tipe air laut

yang berbeda di perairan timur laut Teluk Meksiko.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di bagian timur laut Teluk Meksiko (*Northeastern Gulf of Mexico* (NEGOM)) mulai dari delta sungai Mississippi sampai Teluk Tampa di sebelah barat Florida (Gambar 1) pada tahun 1999 sampai 2000 dengan menggunakan kapal peneliti Gyre selama 2 minggu setiap musim (semi, panas, dan gugur) (Tabel 1). Perairan ini dapat dalam dua tipe perairan, yaitu perairan pantai (perairan tipe-2) dan lepas pantai (offshore) (perairan tipe-1).



Gambar 1. Lokasi penelitian segitiga berwarna ungu merupakan stasiun pengambilan data radiansi dan irradiansi bila kondisi memungkinkan selama penelitian.

Tabel 1. Waktu dan musim pelaksanaan penelitian.

No. <i>cruise</i>	Tanggal mulai	Tanggal selesai	<i>CruiseID</i>	Musim
N6	15 Agustus 1999	28 Agustus 1999	Su-99	Panas
N7	13 November 1999	23 November 1999	Fa-99	Gugur
N8	15 April 2000	26 April 2000	Sp-00	Semi
N9	28 Juli 2000	8 Agustus 2000	Su-00	Panas

2.2. Pengumpulan dan Perolehan Data

Pengambilan data lapangan menggunakan *Fieldspec Analytical Spectral Devices (ASD) Spectroradiometer* (Gambar 2) dilakukan pada setiap pengambilan data CTD setiap transek saat kondisi laut dan cuaca memungkinkan antara pukul 10.30–14.30 waktu setempat. Data *downwelling irradiance* (E_d), *sky radiance* (L_s), dan *upwelling radiance* (L_u) dari permukaan air laut diukur dari *deck* kapal pada berbagai musim dan berbagai tipe air laut yang kemudian dihitung nilai *remote sensing reflektansi* (R_{rs}). Data *upwelling radiance* diukur menggunakan *Fieldspec*

ASD spectroradiometer dengan sudut antara sensor radiansi dan bidang tegak lurus terhadap permukaan laut sebesar 30° . Nilai *sky radiance* diukur dengan sudut antara sensor radiansi dengan bidang tegak lurus terhadap langit sebesar 30° , sedangkan nilai *downwelling irradiance* diukur tegak lurus dengan sensor irradiansi mengarah ke atmosfer. Alat ini mampu merekam data pada selang gelombang 350–1050 nm. Data yang terekam memiliki rentang waktu 100 mili detik (ms). Data L_u , L_s , dan E_d diambil sebanyak 5-9 ulangan setiap stasiun pengamatan.



(a)



(b)

Gambar 2. (a) Tampilan alat *Fieldspec ASD spectroradiometer* (www.asdi.com, 2012), (b) Contoh proses pengambilan data *upwelling radiance*.

2.3. Pengolahan Data

Pengolahan data dimulai dengan melakukan training identifikasi tipe data berdasarkan visualisasi grafik yang dikelompokkan menjadi *radiance upwelling* (L_u), *sky radiance* (L_s), dan *irradiance downwelling* (E_d). Visualisasi grafik ini dikembangkan dengan menggunakan in-house product program dengan software MATLAB. Dari training identifikasi dapat dilihat secara visual data pencilan (data yang menyimpang jauh dari data lainnya dalam satu pengambilan data) sehingga data pencilan ini dapat dihilangkan. Data pencilan dapat terjadi akibat kondisi gelombang sehingga berpengaruh pada sudut perekaman data, faktor tutupan awan, dan faktor *sun glint*. Setelah membuang data pencilan, maka dilakukan perataan data L_u , L_s , dan E_d untuk setiap stasiun pengamatan.

Nilai *water-leaving radiance* (L_w) (radiansi yang keluar dari kolom air dan radiansi yang terpantulkan secara langsung oleh lapisan tipis permukaan air laut) dihitung berdasarkan nilai *upwelling radiance* (L_u) dikurangi *sky radiance* (L_s) dengan rumus sebagai berikut:

$$L_w = L_u - 0,02L_s \dots\dots\dots (1)$$

Sedangkan nilai R_{rs} dihitung dari rasio L_w dan E_d yang kemudian dikoreksi berdasarkan nilai R_{rs} pada panjang gelombang 750 nm untuk menghilangkan pengaruh atmosfer (dimana L_w adalah 0 (nol) pada panjang gelombang 750 nm) dengan rumus berikut (Toole *et al.*, 2000):

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d} - \text{residual (750 nm)} \dots\dots\dots (2)$$

dimana: L_w =*water leaving radiance* ($W m^{-2} sr^{-1}$), L_u =*upwelling radiance* ($W m^{-2} sr^{-1}$), L_s =*sky radiance* ($W m^{-2} sr^{-1}$), E_d =*downwelling irradiance* ($W m^{-2}$), dan R_{rs} =*remote sensing reflectance* (sr^{-1})

Analisis statistik untuk menentukan perbedaan nilai R_{rs} setiap musim pada

panjang gelombang tertentu dilakukan uji Kruskal-Wallis (Walpole, 1992) dengan rumus berikut:

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1) \dots\dots\dots (3)$$

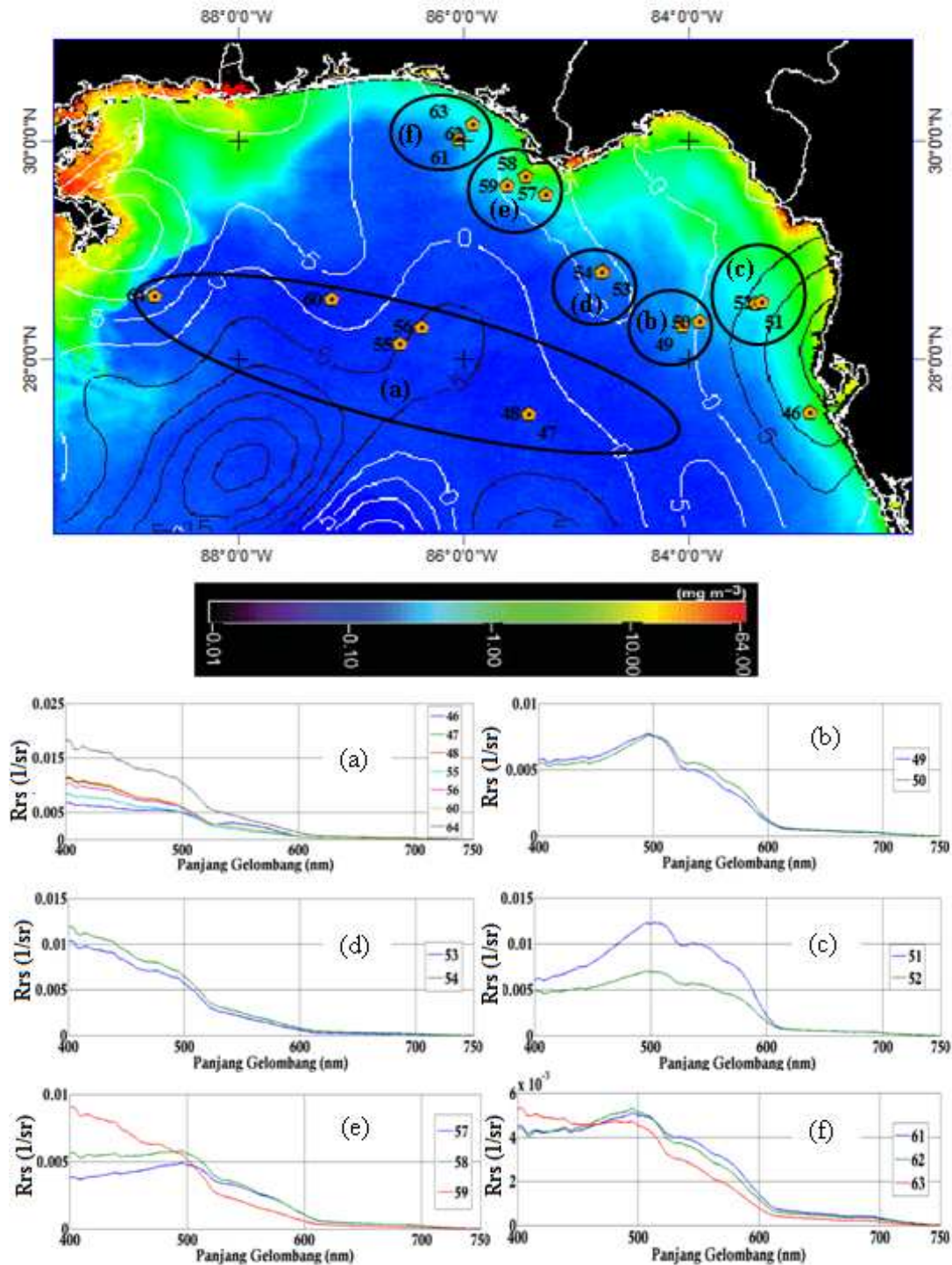
dimana: H =nilai uji Kruskal-Wallis, n =jumlah contoh, k =jumlah kelas, dan R =jumlah ranking pada sampel ke- i .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Spektral R_{rs} Musim Semi (*Spring*)

Spektral R_{rs} dari masing-masing lokasi pengambilan data radiansi dan irradiansi pada musim semi 2000 dikelompokkan berdasarkan tipe air laut yaitu tipe perairan-1 (*offshore*) yang diwakili kelompok stasiun (a), tipe perairan-2 (pesisir) diwakili kelompok stasiun (c), (e), dan (f), dan peralihan antara perairan tipe-1 dan tipe 2 diwakili kelompok (b) dan (d) (Gambar 3). Pada lokasi perairan tipe-1 (*offshore*), spektral R_{rs} mempunyai nilai maksimum pada gelombang biru dan terus menurun pada gelombang hijau dan merah. Nilai R_{rs} maksimum pada gelombang biru (400 nm) di daerah ini berkisar antara $0,007 sr^{-1}$ (stasiun 46) – $0,018 sr^{-1}$ (stasiun 64) (Gambar 3).

Nilai R_{rs} maksimum pada gelombang biru pada lokasi ini menunjukkan bahwa perairannya berwarna biru dan hal ini sesuai dengan pengamatan dari satelit *ocean color* yang dirata-ratakan selama periode pengambilan data lapangan (Gambar 3 bagian atas) (Nababan *et al.*, 2011; Nababan, 2005). Hasil ini juga menunjukkan bahwa perairan tipe-1 adalah perairan dimana variabilitas sifat optik ditentukan oleh variabilitas fitoplankton dan dalam hal ini konsentrasi fitoplankton pada lokasi sangat rendah sehingga warna perairannya cenderung berwarna biru (Gambar 3).



Gambar 3. Spektral R_{rs} pada berbagai lokasi pada musim semi 2000 (bawah; (a) mewakili perairan tipe-1; (c), (e), dan (f) mewakili perairan tipe-2; (b) dan (d) mewakili perairan peralihan antara tipe-1 dan tipe-2). Bagian atas merupakan peta sebaran spasial rata-rata klorofil-a selama pengambilan data lapangan (Nababan *et al.*, 2011) dengan lokasi stasiun pengambilan data R_{rs} . Note: skala sumbu-y berbeda untuk memperjelas penampilan grafik.

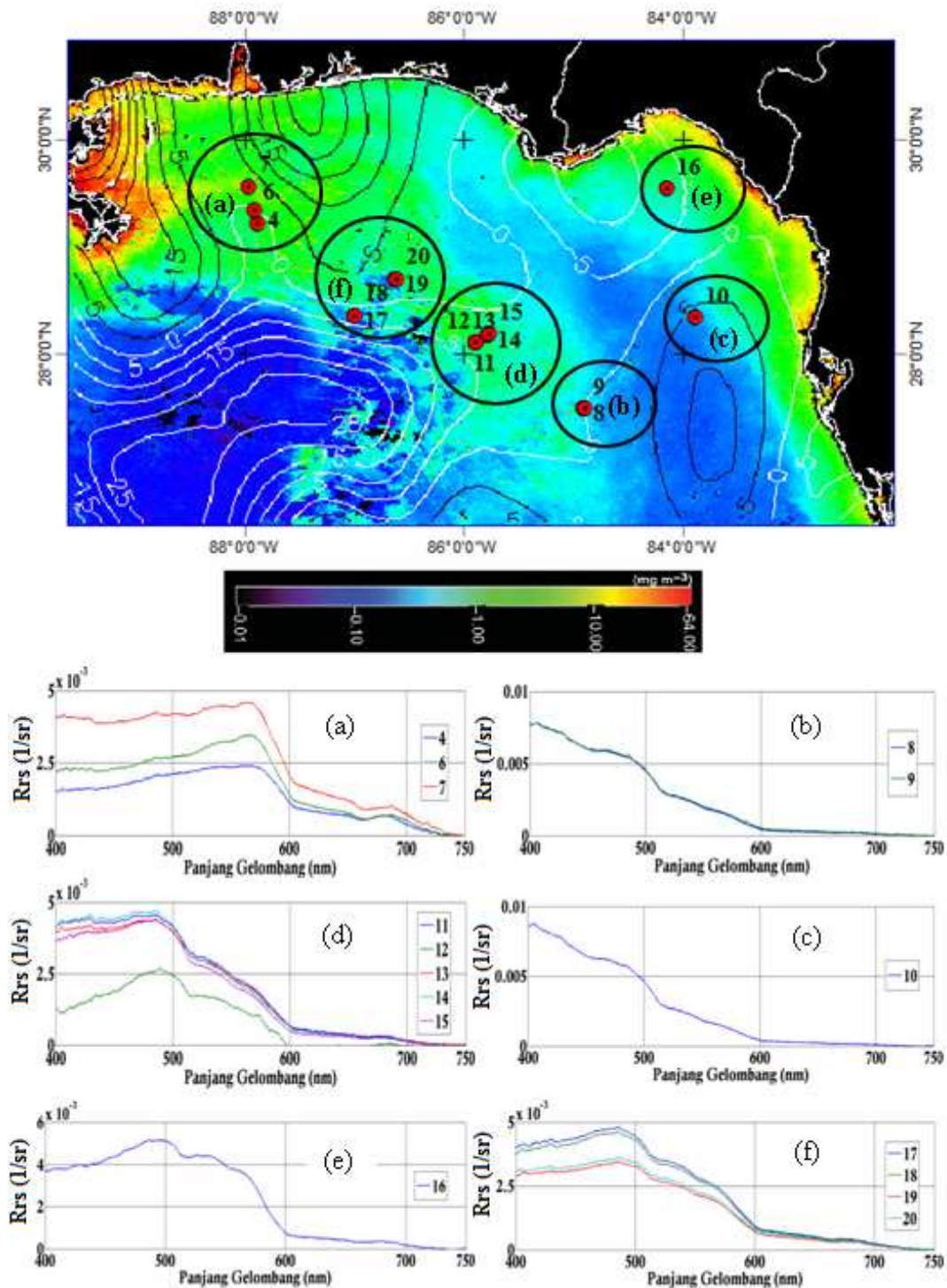
Pada lokasi perairan tipe-2 (pesisir), secara umum spektral R_{rs} relatif rendah pada gelombang biru dan maksimum pada gelombang hijau yang kemudian diikuti penurunan pada gelombang merah (Gambar 3, grafik c, e, dan f). Nilai R_{rs} maksimum pada gelombang hijau (500 nm) di daerah pesisir ini berada pada kisaran $0,005 \text{ sr}^{-1} - 0,015 \text{ sr}^{-1}$ (Gambar 3, grafik c, e, dan f). Sementara pada perairan peralihan antara perairan tipe-1 dan tipe-2, spektral R_{rs} berada pada dua jenis spektral yang berbeda yaitu daerah (d) lebih condong kedalam spektral perairan laut lepas dan daerah (b) yang lebih condong kedalam spektral perairan pesisir (Gambar 3, grafik b dan d). Dari hasil analisis satelit *ocean color* (Gambar 3, bagian atas) terlihat bahwa konsentrasi klorofil-a pada daerah (b) relatif lebih tinggi dibandingkan dengan daerah (d). Hal ini dapat mendukung hasil penelitian terhadap spektral R_{rs} pada daerah (b) yang cenderung menyerupai spektral R_{rs} perairan pesisir dan spektral R_{rs} daerah (d) condong kepada spektral perairan laut lepas. Dalam sebaran konsentrasi klorofil-a pada daerah (b) dan (d) tidak terlihat perbedaan yang nyata namun dalam spektral R_{rs} terlihat perbedaan yang nyata. Hal ini terjadi karena sebaran konsentrasi klorofil-a merupakan hasil rata-rata dua mingguan sementara spektral R_{rs} merupakan hasil pengamatan harian sehingga perbedaan yang nyata mungkin terlihat pada spektral R_{rs} sementara pada sebaran konsentrasi klorofil-a tidak terlihat.

3.2. Spektral R_{rs} pada Musim Panas

Berbeda dengan musim semi sebelumnya, pada musim panas 1999 dan 2000 terlihat perbedaan spektral R_{rs} pada perairan tipe-1 (*offshore*) yang secara umum cenderung menyerupai spektral R_{rs} perairan tipe-2 dimana nilai R_{rs} maksimum terjadi pada perbatasan gelombang biru dan hijau (488 nm). Hal

ini terjadi karena pada musim panas, angin yang berasal timur dan tenggara berperan aktif membawa aliran sungai Mississippi mengalir ke arah timur dan tenggara muara sungai Mississippi. Aliran sungai pada musim panas ini diperkuat oleh adanya *Loop Current* yang mendekati daerah *De Soto Canyon* (dekat muara sungai Mississippi) yang berperan aktif dalam menyeret aliran sungai Mississippi lebih jauh ke arah offshore arah timur dan tenggara yang menyebabkan kandungan konsentrasi klorofil-a dan CDOM relatif lebih tinggi di daerah offshore dibandingkan pada musim lainnya seperti terlihat pada hasil analisis satelit *ocean color* (Nababan *et al.*, 2011; Nababan, 2008a dan 2008b; Nababan, 2005; Gambar 4, bagian atas).

Pada Gambar 4 ditampilkan contoh sebaran rata-rata konsentrasi klorofil-a selama pengambilan data di lapangan serta spektral R_{rs} pada musim panas 1999. Nilai R_{rs} maksimum pada perairan offshore lokasi (d) dan (f) berada pada perbatasan gelombang biru dan hijau (488 nm) berkisar antara $0,0026 \text{ sr}^{-1} - 0,0047 \text{ sr}^{-1}$ (Gambar 4, grafik (d) dan (f)). Spektral R_{rs} di daerah *offshore* yang cenderung mengarah kepada spektral R_{rs} daerah pesisir (perairan tipe-2) disebabkan oleh pengaruh aliran sungai Mississippi yang membawa banyak bahan organik dan nutrient untuk perkembangan fitoplankton seperti terlihat dari hasil analisis satelit *ocean color* (Nababan *et al.*, 2011; Nababan, 2009, 2005; Walsh *et al.*, 2003, Gambar 4 bagian atas). Sedangkan daerah offshore lainnya (lokasi b) menunjukkan spektral R_{rs} perairan tipe-1 dimana maksimum pada gelombang biru dan terus menurun pada gelombang hijau dan merah. Spektral R_{rs} yang hampir sama juga terlihat pada perairan peralihan antara tipe-1 dan tipe-2 (lokasi c). Spektral R_{rs} pada lokasi (b) dan (c) yang terlihat seperti spektral perairan tipe-1 tidak sesuai dengan hasil analisis



Gambar 4. Spektrak R_{rs} pada berbagai lokasi pada musim panas 1999 (bawah: (a) dan (e) mewakili perairan tipe-2; (b), (d), dan (f) mewakili perairan tipe-1, namun (d) dan (f) terkontaminasi dengan aliran sungai Mississippi. Bagian atas merupakan peta sebaran spasial rata-rata klorofil pada pengambilan data lapangan (Nababan *et al.*, 2011). Note: skala sumbu-y berbeda untuk memperjelas penampilan grafik.

satelit *ocean color* yang ada, hal ini terjadi karena sebaran konsentrasi klorofil-a yang ditampilkan adalah sebaran rata-rata konsentrasi klorofil-a selama 2 minggu (selama pengambilan data lapangan) sehingga ada kemungkinan pada saat pengambilan data radiansi dan irradiansi kondisi sebaran konsentrasi klorofil-a pada lokasi tersebut tidak seperti yang digambarkan pada Gambar 4. Untuk lokasi dekat muara sungai Mississippi (a), terlihat dengan jelas bahwa spektral R_{rs} memiliki nilai maksimum pada gelombang hijau (580 nm) dengan nilai maksimum berkisar antara $0,003 \text{ sr}^{-1}$ – $0,004 \text{ sr}^{-1}$ (Gambar 4, grafik a). Sedangkan spektral R_{rs} pada lokasi dekat muara sungai Apalachicola dan Suwannee (e) memiliki nilai maksimum pada gelombang hijau (500 nm) sebesar $0,005 \text{ sr}^{-1}$. Adanya perbedaan nilai maksimum R_{rs} pada dua daerah pesisir yang berbeda ini menunjukkan kemungkinan adanya perbedaan komposisi dan jenis fitoplankton serta kandungan bahan organik khususnya *colored dissolved organic matter* (CDOM) (Nababan, 2009, 2008; Walsh *et al.*, 2003; Carder *et al.*, 2001; Hoepffner and Sathyendranath, 1993).

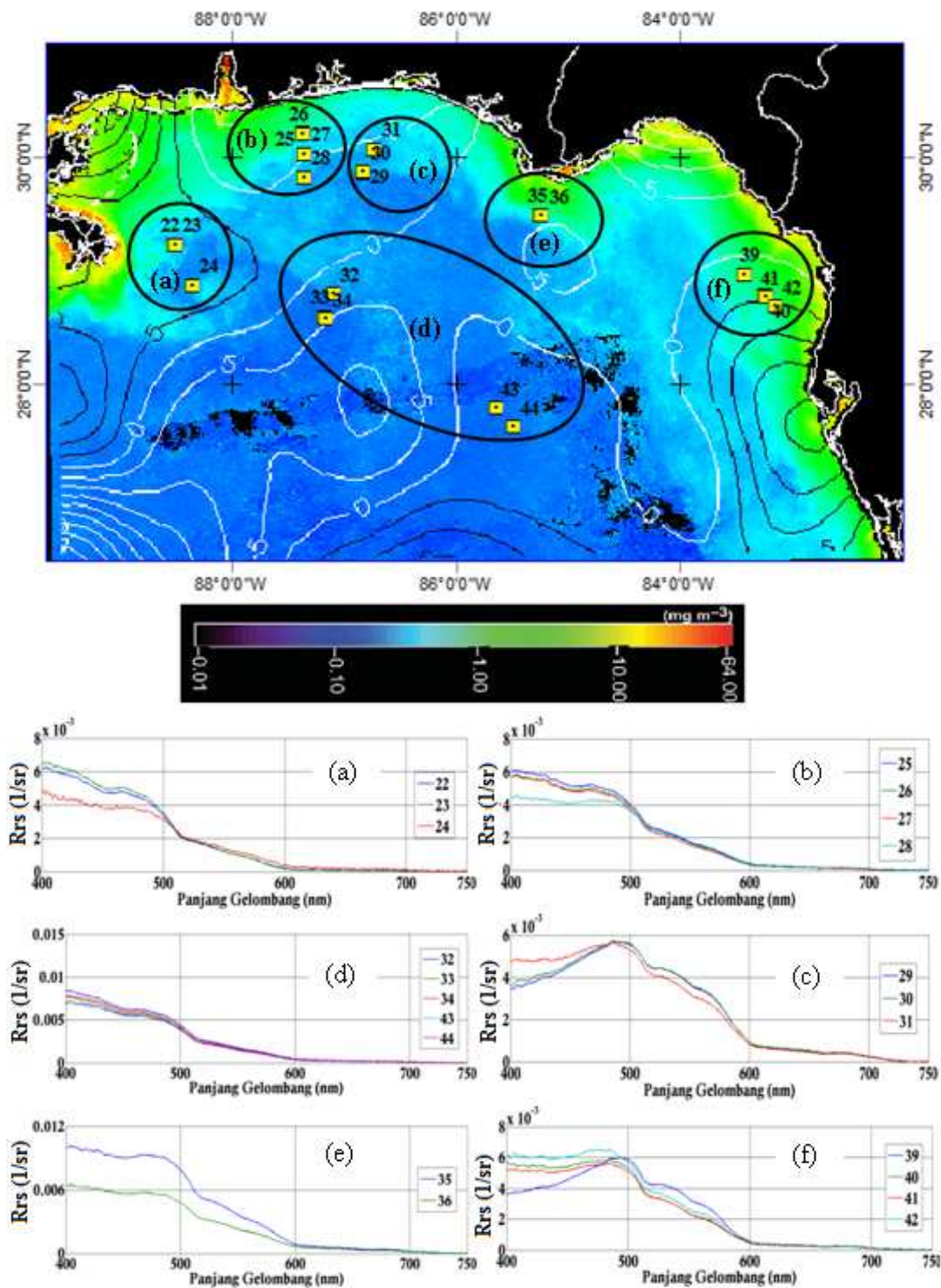
3.3. Spektral R_{rs} Musim Gugur

Pola spektral R_{rs} pada musim gugur dapat dikelompokkan kedalam tiga group yaitu: (1) group perairan tipe-1 dimana spektral R_{rs} memiliki nilai maksimum pada gelombang biru yang kemudian menurun pada gelombang hijau dan merah (Gambar 5, a dan d). Hasil ini sesuai dengan hasil analisis satelit *ocean color* dimana pada daerah ini nilai rata-rata konsentrasi klorofil-a selama penelitian relatif rendah ($<0,1 \text{ mg m}^{-3}$) (Gambar 5 bagian atas). (2) group perairan peralihan dari perairan tipe-2 ke tipe-1 dimana secara umum spektral R_{rs} secara umum memiliki nilai maksimal pada gelombang biru namun ada sedikit

peningkatan pada perbatasan gelombang biru dan hijau (488 nm) (Gambar 5, b dan e). Adanya sedikit peningkatan pada perbatasan gelombang biru dan hijau menandakan adanya pengaruh fitoplankton terhadap nilai spektral R_{rs} pada lokasi ini dan hal ini dapat terlihat dari data satelit dimana nilai rata-rata konsentrasi klorofil-a pada lokasi ini relatif lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi *offshore*. (3) kelompok perairan pesisir dekat muara sungai Escambia dan Suwannee dimana spektral R_{rs} pada dua lokasi ini menunjukkan spektral perairan tipe-2 dan nilai R_{rs} maksimum berada pada gelombang hijau (Gambar 5, c dan f). Hasil ini sesuai dengan hasil analisis satelit *ocean color* dimana mulai dari peralihan perairan tipe-1 sampai perairan tipe-1 (*offshore*) memiliki nilai rata-rata konsentrasi klorofil-a yang relatif rendah (Gambar 5, bagian atas).

Kisaran nilai maksimum R_{rs} pada gelombang biru ($\lambda=400 \text{ nm}$) di daerah *offshore* pada musim gugur berkisar antara $0,0065 \text{ sr}^{-1}$ – $0,008 \text{ sr}^{-1}$, sedangkan kisaran nilai R_{rs} pada gelombang hijau ($\lambda=488 \text{ nm}$) di daerah pesisir berkisar antara $0,005 \text{ sr}^{-1}$ – $0,009 \text{ sr}^{-1}$ (Gambar 5).

Secara umum, spektral R_{rs} pada musim gugur di perairan timur laut Teluk Meksiko memperlihatkan karakteristik perairan tipe-1 kecuali daerah pesisir dekat muara sungai. Hal ini terlihat dari pola sebaran spektral R_{rs} yang secara umum memiliki nilai maksimum pada gelombang biru. Hasil ini juga didukung dengan hasil analisis satelit *ocean color* yang menunjukkan nilai rata-rata konsentrasi klorofil-a yang relatif kecil sepanjang perairan timur laut Teluk Meksiko (Gambar 5, bagian atas). Relatif rendahnya kandungan konsentrasi klorofil-a pada daerah pesisir dibandingkan dengan musim lainnya disebabkan karena pada musim gugur debit sungai-sungai yang bermuara ke timur laut Teluk Meksiko relatif lebih kecil dibandingkan



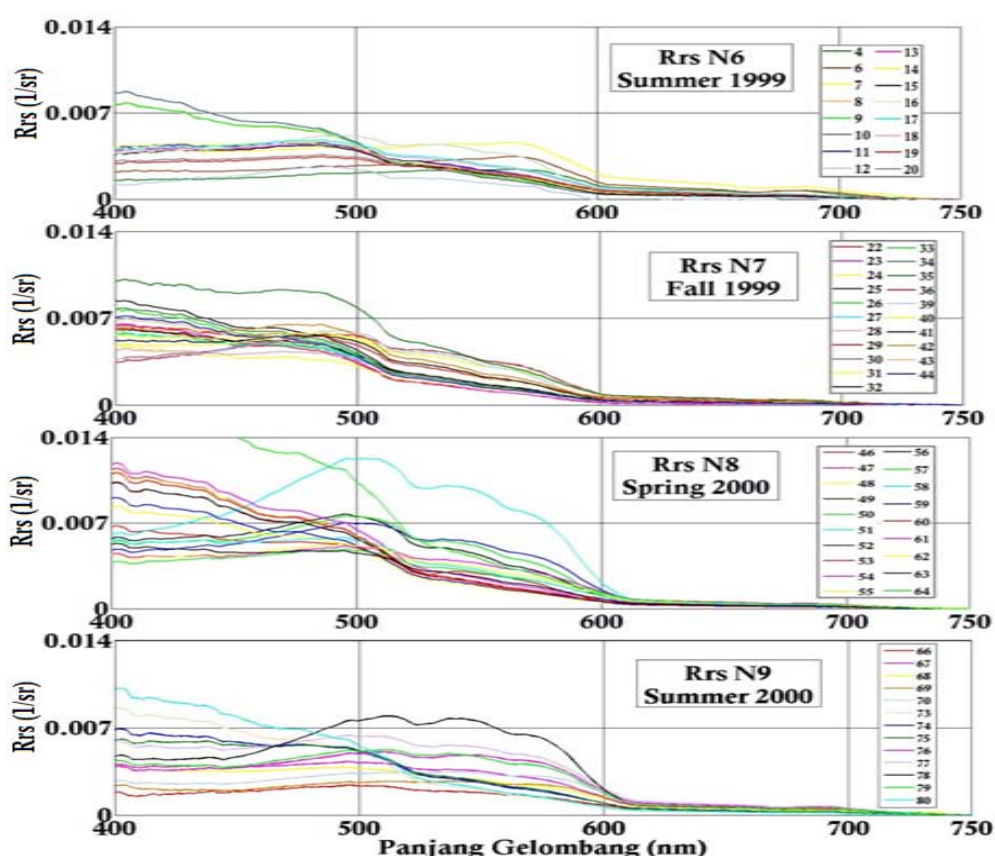
Gambar 5. Spektral R_{rs} pada berbagai lokasi pada musim gugur 1999 (bawah: (a) dan (d) mewakili perairan tipe-1; (c) dan (f) mewakili perairan tipe-2; (b) dan (e) mewakili peralihan perairan tipe-2 dan tipe-1. Bagian atas merupakan peta sebaran spasial rata-rata klorofil-a pada pengambilan data lapangan (Nababan *et al.*, 2011). Note: skala sumbu-y berbeda untuk memperjelas penampilan grafik.

dengan debit sungai pada musim lainnya serta arah angin yang berasal dari timur dan timur laut mengakibatkan intrusi air sungai Mississippi ke arah timur dan timur laut menjadi tidak berkembang (Nababan *et al.*, 2011; Walsh *et al.*, 2003).

3.4. Perbandingan R_{rs} pada Berbagai Musim dan Tipe Perairan

Berdasarkan analisis spektral R_{rs} dari keseluruhan stasiun pada perairan timur laut Teluk Meksiko setiap musim, secara umum pola spektral dan nilai rata-rata R_{rs} pada gelombang biru, hijau, dan merah berbeda nyata antar musim (berbeda nyata berdasarkan uji Kruskal-Wallis pada taraf $\alpha=0,01$; Gambar 6). Hasil ini menunjukkan adanya perbedaan nyata terhadap sebaran dan kandungan klorofil-a, muatan tersuspensi, dan bahan

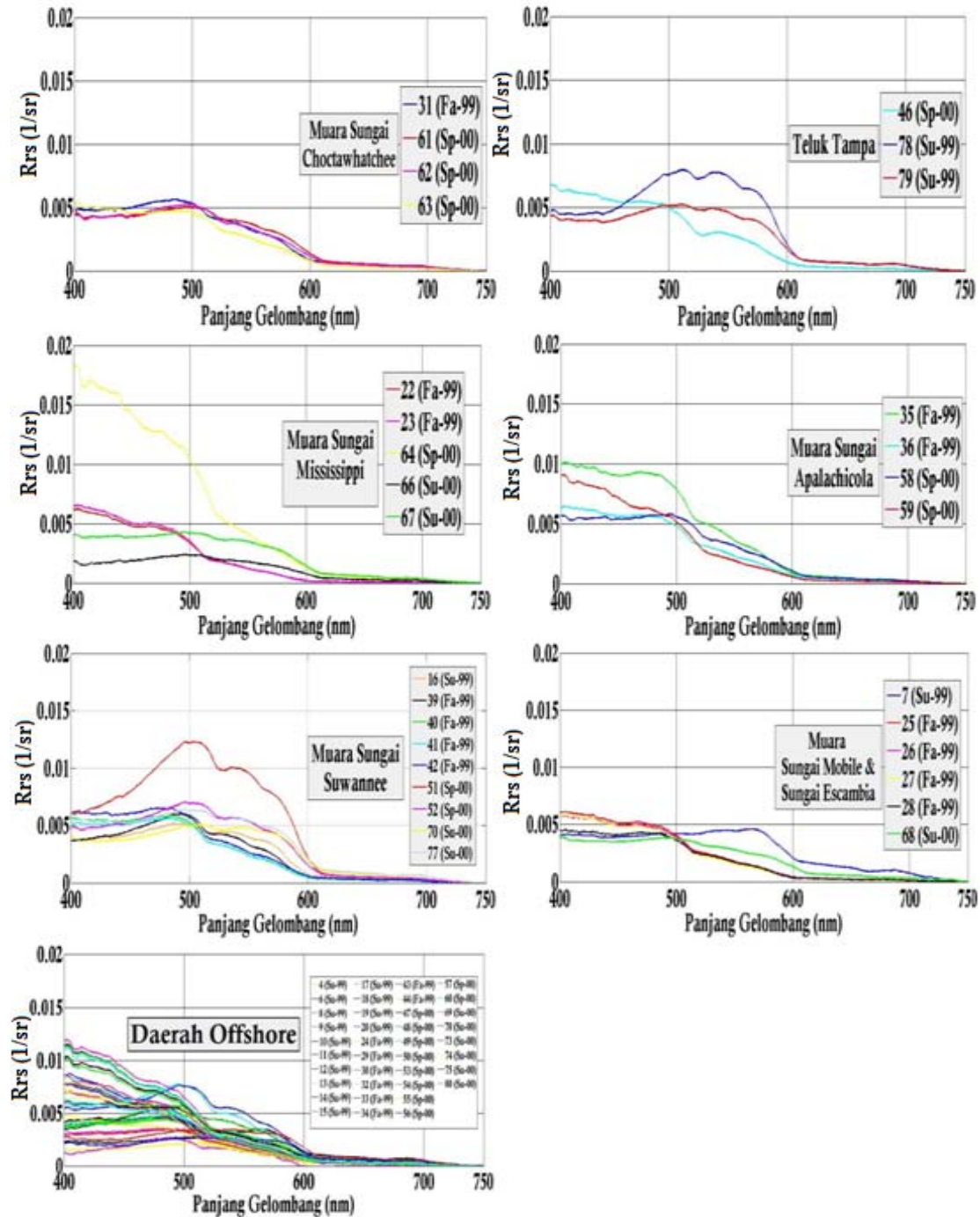
organik dalam perairan timur laut Teluk Meksiko. Perbedaan nyata akan sebaran dan kandungan klorofil-a, muatan tersuspensi, dan bahan organik dalam perairan timur laut Teluk Meksiko antar musim ini disebabkan oleh adanya perubahan yang nyata antar musim terhadap gerakan angin di atas permukaan laut timur laut Teluk Meksiko yang dapat merubah arah dan kecepatan arus, posisi *Loop Current* yang selalu bergerak atau berubah setiap musim, serta jumlah debit air dari berbagai sungai yang bermuara ke perairan timur laut Teluk Meksiko khususnya debit air dari sungai Mississippi (Nababan, 2005; Nababan *et al.*, 2011; Gilbes *et al.*, 1996; Nowlin *et al.*, 2003; Muller-Karger, 2000).



Gambar 6. Spektral R_{rs} berbagai musim di perairan timur laut Teluk Meksiko memperlihatkan pola spektral dan nilai R_{rs} maksimum yang berbeda setiap musim.

Secara umum pada setiap musim, pola spektral R_{rs} pada perairan pesisir (perairan tipe-2) khususnya dekat muara sungai Mississippi, Mobile, Escambia dan Choctawhatchee, Apalachicola, Suwannee, dan Teluk Tampa relatif

rendah pada gelombang biru kemudian meningkat sampai nilai maksimum pada gelombang hijau dan menurun lagi pada gelombang merah sampai mendekati nilai nol (Gambar 7).



Gambar 7. Spektral R_{rs} selama penelitian pada beberapa lokasi pengukuran yang berbeda.

Hasil ini menunjukkan bahwa di sekitar perairan pesisir ini nilai spektral R_{rs} didominasi oleh pengaruh fitoplankton. Pada berbagai pengukuran, nilai maksimum R_{rs} kadang berada pada panjang gelombang hijau yang berbeda (488, 500, 530, dan 550 nm), hal ini menunjukkan adanya perbedaan jenis dan komposisi fitoplankton, kandungan bahan organik, dan materi tersuspensi pada lokasi tersebut (Nababan, 2009, 2008b; Del Castillo *et al.*, 2001; Lohrenz *et al.*, 1999; Carder *et al.*, 1996).

Untuk daerah offshore (perairan tipe-1), secara umum spektral R_{rs} memiliki nilai maksimum pada gelombang biru yang terus menurun pada gelombang hijau dan merah kecuali pada musim panas dimana intrusi air tawar dari sungai Mississippi mempengaruhi spektral R_{rs} pada perairan offshore sampai pada jarak 550 km arah timur-tenggara (*east-southeastward, ESE*) dari muara sungai Mississippi (Nababan *et al.*, 2011; Nababan, 2005) yang mengakibatkan nilai maksimum R_{rs} pada musim panas di daerah offshore ini berada pada gelombang hijau sebagai akibat pengaruh *blooming* fitoplankton. Intrusi air tawar dari sungai Mississippi ini dapat terbawa lebih jauh lagi sampai *West Florida Shelf* (Walker, 1996; Huh *et al.*, 1981). Pengaruh aliran sungai Apalachicola dan Suwannee juga dapat mencapai daerah offshore khususnya pada musim semi (Jollif *et al.*, 2003; Gilbes *et al.*, 2002, 1996). Sementara aliran sungai Mobile, Escambia, dan Choctawhatchee dianggap bersifat lokal. Namun secara umum, fluktuasi debit sungai-sungai yang bermuara ke timur laut Teluk Meksiko mempengaruhi produktivitas primer secara spasial dan temporal di perairan timur laut Teluk Meksiko (Eurico, 2002; Son *et al.*, 2009; Nababan *et al.*, 2011; Walsh *et al.*, 2003). Masukan nutrient dari darat dan ketersediaan cahaya matahari merupakan faktor utama dalam

proses fotosintesis dan produktivitas primer, hal inilah yang menyebabkan nilai R_{rs} pada musim panas di perairan Teluk Meksiko dominan berada pada gelombang hijau yang menunjukkan tingginya konsentrasi klorofil-a terutama pada muara-muara sungai.

Pada musim panas 1999 dan 2000, secara umum pantulan gelombang hijau lebih tinggi dibandingkan pada gelombang biru dan merah khususnya di daerah pesisir dan sebagian daerah offshore (Gambar 7). Pada musim panas, kondisi perairan pesisir dekat muara sungai Mississippi terlihat dengan jelas memiliki spektral R_{rs} maksimum pada gelombang hijau dan hal ini juga terlihat dari citra satelit ocean color yang memiliki rata-rata konsentrasi klorofil yang relatif tinggi. Kondisi berbeda terjadi saat musim gugur 1999 dan musim semi 2000, pada lokasi yang sama kondisi perairan cenderung memiliki rata-rata konsentrasi klorofil-a yang relatif rendah dengan nilai reflektansi maksimum pada gelombang biru (Gambar 7).

IV. KESIMPULAN

Secara umum spektral R_{rs} pada perairan pesisir khususnya dekat muara sungai (perairan tipe-2) memiliki pola spektral yang relatif rendah pada gelombang biru dan maksimum pada gelombang hijau serta menurun sampai minimum pada gelombang merah. Pada perairan offshore (tipe-1), secara umum pola spektral R_{rs} maksimum pada gelombang biru yang kemudian terus menurun pada gelombang hijau sampai minimum pada gelombang merah kecuali saat musim panas dimana spektral R_{rs} pada sebagian besar daerah offshore memiliki nilai maksimum pada gelombang hijau akibat adanya *blooming* fitoplankton di daerah ini sebagai hasil intrusi air tawar dari sungai Mississippi.

Secara umum pola dan nilai spektral R_{rs} berbeda nyata antar musim dan antar lokasi khususnya dekat muara sungai di perairan timur laut Teluk Meksiko. Nilai R_{rs} gelombang biru ($\lambda=400$ nm) pada musim semi secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan musim lainnya berkisar $0,007-0,018 \text{ sr}^{-1}$ pada perairan *offshore* dan $0,004-0,015 \text{ sr}^{-1}$ pada perairan pesisir. Nilai R_{rs} gelombang hijau ($\lambda=500$ nm) pada musim semi juga memiliki nilai paling tinggi berkisar $0,005-0,013 \text{ sr}^{-1}$ terdapat pada perairan pesisir. Pada musim panas, nilai maksimum R_{rs} gelombang hijau berada pada panjang gelombang dan lokasi yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan dalam jenis dan komposisi fitoplankton serta bahan organik dan muatan tersuspensi pada lokasi tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada Prof. Dr. Frank E. Muller-Karger, Direktur *Institute of Marine Remote Sensing, University of South Florida, St. Petersburg, Florida* yang telah memberikan fasilitas dan bimbingan dalam pengambilan data lapangan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada Dr. N.L. Guinasso sebagai *Co-Chief Scientist* untuk *NEGOM-COH field work on the R/V Gyre* serta semua NEGOM Science Team dan *crew* kapal yang telah ikut membantu dalam pengambilan data lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- ASDI. 2010. Fieldspec 4 standard-res spectroradiometer. <http://www.asdi.com/products/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-4-standard-res>. (accessed: 7 August 2012).
- Carder, K.L., R.G. Steward, J.H. Paul, and G.A. Vargo. 1986. Relationships between chlorophyll and ocean color constituents as they affect remote-sensing reflectance models. *Limnol. Oceanogr.*, 31(2):403-413.
- Del Castillo, C.E., P.G. Coble, R.N. Conmy, F.E. Muller-Karger, L. Vanderbloemen, and G. A. Vargo. 2001. Multispectral in situ measurements of organic matter and chlorophyll fluorescence in seawater: Documenting the intrusion of the Mississippi River plume in the West Florida Shelf. *Limnol. Oceanogr.*, 46(7):1836-1843.
- Eurico, J.D. and R.L. Miller. 2002. Bio-optical properties in waters influenced by the mississippi river during low flow conditions. *Remote sensing of environment*. 84:538-549.
- Gilbes, F., C. Thomas, J.J. Walsh, and F.E. Muller-Karger. 1996. An episodic chlorophyll-a plume on the west florida shelf. *Continental Shelf Research*, 16:1201-1224.
- Gilbes, F., F.E. Muller-Karger, and C.E. Del Castillo. 2002. New evidence for the West Florida Shelf plume. *Continental Shelf Res.*, 22:2479-2496.
- Hoepffner, N. and S. Sathyendranath. 1993. Determination of the major groups of phytoplankton pigments from the absorption spectra of total particulate matter. *J. Geophys. Res.*, 98:22789-22803.
- Hu, C. 2003. A simple instrument for measurement of remote sensing reflectance incoastal environment. *Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications*. 219:1-8.
- Hu, C., F.E. Muller-Karger, D.C. Biggs, K.L. Carder, B. Nababan, D.

- Nadeau, and J. Vanderbloemen. 2003. Comparison of ship and satellite bio-optical measurements o the continental margin of the NE Gulf of Mexico. *Int. J. Rem. Sensing*, 24(13):2597-2612.
- Huh, O.K., W.J. Wiseman, and L.J. Rouse. 1981. Intrusion of loop current waters onto the West Florida shelf. *J. of Geophysical Research*, 86(C5):4186-4192.
- Jolliff, J.K., J.J. Walsh, R. He, R. Weisberg, A. Stovall-Leonard, P.G. Coble, R. Conny, C. Heil, B. Nababan, H. Zhang, C. Hu, and F.E. Muller-Karger. 2003. Dispersal of the Suwannee river plume over the West Florida shelf: Simulation and observation of the optical and biochemical consequences of flushing event. *Geophys. Res. Letter*, 30(13):1709-1712.
- Kirk, J.T.O. 1994. Light photosynthesis in aquatic ecosystem. Second edition. New York: Cambridge University Press. 500p.
- Liew, S.C., L.K. Kwoh, and H. Lim. 2000. Classification of algal bloom types from remote sensing reflectance. *Proceedings of 21st Asian Conference on Remote Sensing*, 4-8 Dec 2000, Taipe, Taiwan. 2:794-799.
- Lohrenz, S.E., M.J. Dagg, and T.E. Whitledge. 1990. Enhanced primary production at the plume/oceanic interface of the mississippi river. *Continental shelf research*, 10:639-664.
- Mobley, C.D. 1994. Light and water radiative transfer in natural waters. California: Academic Press, Inc. 579p.
- Muller-Karger, F.E. 2000. The spring 1998 northeastern gulf of mexico (NEGOM) cold water event: remote sensing evidence for upwelling and for eastward advection of mississippi water (or : how an errant loop current anticyclone took the NEGOM for a spin). *Gulf of Mexico Science*. 18:55-65.
- Nababan, B. 2005. Bio-optical variability of surface waters in the northeastern gulf of mexico [disertasi]. Florida: University of South Florida. 159p.
- Nababan, B., F.E. Muller-Karger, C. Hu, and D.C. Biggs. 2011. Chlorophyll variability in the northeastern gulf of mexico. *Int. J. of remote sensing*. 32(23):8373-8392.
- Nababan, B. 2009. Variability in the light absorption coefficients of phytoplankton, detritus and their relationship with chlorophyll-a concentration of surface waters. *J. Kelautan Nasional, 1(Special Edition):41-53*.
- Nababan, B. 2008a. Comparison of chlorophyll concentration estimation using two different algorithms and the effect of colored dissolved organic matter. *Int. J. of Remote Sensing and Earth Sciences*, 5:92-101.
- Nababan, B. 2008b. The use of colored dissolved organic matter to estimate salinity from space. *J. Kelautan Nasional*, 3(1):39-51.
- Nowlin, Jr., W.D., A.E. Jochens, M.K. Howard, S.F. DiMarco, and W.W. Schroeder. 2000. Hydrographic properties and inferred circulation over the Northeastern Shelves of the Gulf of Mexico during Spring to Midsummer of 1998. *Gulf of Mexico Science*, 18(1):40-45.
- Ohlmann, J.C., and P.P. Niiler. 2005. Circulation over the continental shelf in the northern gulf of mexico. *Progress in oceanography*. 65:45-81.

- Toole, D.A., D.A. Siegel, D.W. Menzies, M.J. Neumann, and R.C. Smith. 2000. Remote-sensing reflectance determinations in the coastal ocean environment: impact of instrumental characteristics and environmental variability. *Applied Optics*. 39:456-468.
- Son, Y.B., W.D. Gardner, A.V. Mishonov, and M.J. Richardson. 2009. Multispectral remote-sensing algorithms for particulate organic carbon (POC): the gulf of mexico. *Remote sensing of environment*. 113:50-61.
- Walsh, J.J., R.H. Weisberg, D.A. Dieterle, R. He, B.P. Darrow, J.K. Jolliff, K.M. Lester, G.A. Vargo, G.J. Kirkpatrick, K.A. Fanning, T.T. Sutton, A.E. Jochens, D.C. Biggs, B. Nababan, C. Hu, and F.E. Muller-Karger. 2003. Phytoplankton response to intrusions of slope water on the West Florida Shelf: Models and observations, *J. Geophys. Res.*, 108(C6):3190-3212.
- Walker, N.D. 1996. Satellite assessment of mississippi river plume variability: causes and predictability. *Remote sensing of environment*. 58:21-35.
- Wozniak, B. and M. Ostrowska. 1990. Optical absorption properties of phytoplankton in various seas. *Oceanologia*, 29:117-146.
- Yang, H. and R. H. Weisberg. 1999. Response of the West Florida Shelf to climatological wind stress forcing. *J. Geophys. Res.* 104(C3):5301-5320.

Diterima : 20 Februari 2013

Direvisi : 15 April 2013

Disetujui : 12 Juni 2013